

実物体と影の変形を用いた情報の秘匿と選択的視覚化

阪口紗季¹⁾(非会員) 東納ひかり²⁾(非会員) 松下光範²⁾(正会員)

1) 関西大学大学院総合情報学研究科 2) 関西大学総合情報学部

Selective Visualization of Complex Information Using Physical Objects and Shadow Shapes

Saki Sakaguchi¹⁾ Hikari Tono²⁾ Mitsunori Matsushita²⁾

1) Graduate School of Informatics, Kansai University

2) Faculty of Informatics, Kansai University

{k107221, k658066, m_mat} @ kansai-u.ac.jp

概要

古来より、あぶり出しなどの実物体に情報を秘匿する手法が考案されているが、このような手法には、複数の情報を付与することや、それらを選択的に取り出すことが容易ではない、といった制約が存在する。本研究では、これらの制約を緩和し、実物体への情報の秘匿と、秘匿された情報の選択的視覚化を可能にする手法を提案する。提案手法では、物体に秘匿された情報を視覚化する媒体として、影を利用する。赤外光を透過するフィルタと偏光板の性質を利用し、物体を赤外光にかざした上で、物体の回転角度に応じて光の透過/遮蔽を制御することによって、物体から生成される影の形状を変化させる。これにより、物体に秘匿された2種類の形状情報を、物体の回転角度を変える・照射する光の種類を変更する、といった条件の変化に応じて、影の形状として選択的に視覚化する。

Abstract

This paper proposes a method for hiding information inside an actual object and viewing the hidden information as shadows selectively by irradiating infrared lights. The shape of the visualized shadow changes when the object is rotated, by using the property of the polarizing plate. Thus, a user can change the visualized information according to the angle of the object.

1 はじめに

古来より、実物体に情報を秘匿する手法が考案されている。例えば、あぶり出しでは柑橘類の果汁を使って文字や絵などの図柄を紙に描くことによって、情報を付与する。果汁が乾燥すると描いた図柄は視認できなくなるが、紙を火で炙ることにより果汁で描いた部分に色が徐々に浮かび上がり、隠された図柄を見ることができるようになる。また、紙幣には偽造防止のために透かし模様が埋め込まれており、光にかざすことによって、模様が浮かび上がる仕組みになっている。

このような手法には、(1) 情報を特有の手法で付与する必要がある、(2) 複数の情報を付与した場合、その中から一部だけを選択的に視覚化することが容易ではない、といった制約が存在する。これに対し、光学ディスクやフラッシュメモリなどの情報記録媒体は、多様な情報を媒体に格納することや、格納した情報を選択的に取得することを可能にする。また、液晶ディスプレイやプロジェクションを用いて情報を視覚化する手法では、視覚情報の動的な付与や可視/不可視の制御が容易である。しかしながら、実物体に情報を秘匿する手法には、一度付与した情報を後から変更することができないという唯一性があることによって、その実物体に紐付いた“意味”を与えることができる。また、情報の視覚化において、特有の操作を行うことにより、その操作に見合った情報の現れ方をするといった固有性を持つことから、人の行為に応じた適応的な情報提示を可能にする。これらの理由から、実世界における、実物体を介した特殊な情報秘匿・提示手法としての利用が見込まれる。本研究では上述した実物体に情報を秘匿する手法における制約のうち、(2) を緩和し、実物体に複数の情報を秘匿し、それらを条件に応じて選択的に視覚化することができる手法を提案する。提案手法では、物体に秘匿された情報を視覚化する媒体として、影を利用する。これにより、実物体の外観からは秘匿された情報は見えないが、影を作ったときにだけ情報が見えるといったように、特定の条件下でのみ情報を視覚化する仕組みを作る。また、物体に情報を秘匿し、影の中に視覚化するために、複数種の光学素子の性質を利用する。光学素子によって光の透過/遮蔽を制御し、影の形状を変化させることによって、物体に秘匿された情報を映し出す。これにより、実物体と

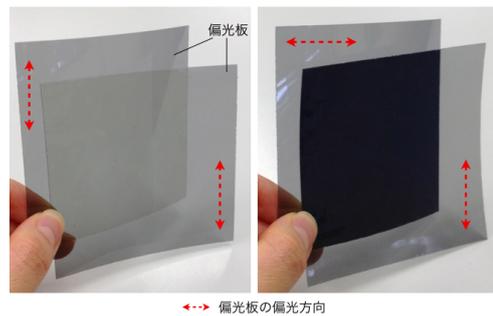


図1 偏光板を重ねた様子。

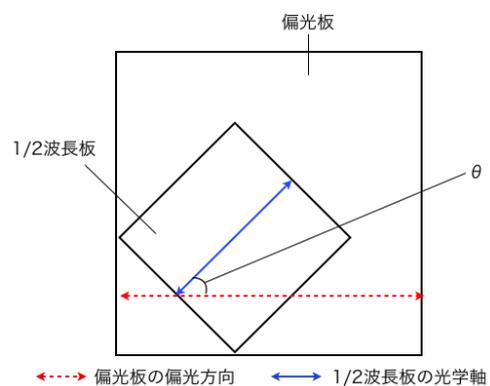


図2 偏光方向と光学軸の角度。

その影とのインタラクションを通じた情報の秘匿と選択的視覚化を実現する。

2 提案システムで用いる光学素子

提案システムでは、ある特定の実物体（以下、オブジェクトと記す）を介した情報の秘匿と選択的視覚化を実現するために、偏光板と1/2波長板と光吸収・透過フィルタを利用する。本章ではそれぞれの性質について述べる。

2.1 偏光板

偏光板は、特定の方向に振動した光（偏光）のみを透過し、それ以外の光を遮蔽する性質を持つ素材である。偏光方向を揃えた状態で2枚の偏光板を重ねた場合、図1の左に示すように、光は透過される。偏光方向を直交させた状態で2枚の偏光板を重ねた場合、図1の右に示すように、光は遮蔽される。この性質を利用することで、偏光板を重ねる角度による、光の透過と遮蔽の制御が可能になる。

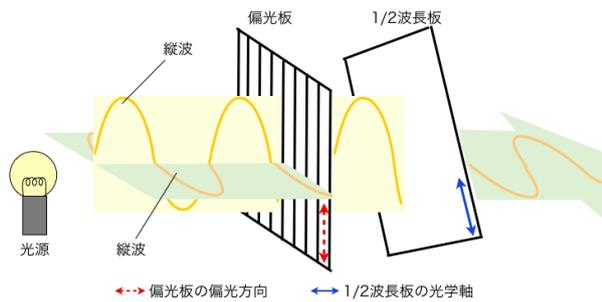


図3 1/2波長板の光学軸が45°になるように重ねた状態。偏光板を透過した縦波が1/2波長板によって90°回転し、横波になる。

2.2 1/2波長板

1/2波長板は、偏光の振動方向を変える性質を持ったフィルタである。偏光板の偏光方向に対して、1/2波長板において光を入射しても複屈折しない方向（光学軸）の角度を θ となるように重ね（図2参照）、偏光板側から光を入射すると、入射光の振動方向が 2θ 回転するようになる。つまり、偏光板の偏光方向に対して1/2波長板の光学軸が 0° 、 90° 、 180° 、 270° の時には、 $0^\circ \times 2 = 0^\circ$ 、 $90^\circ \times 2 = 180^\circ$ 、 $180^\circ \times 2 = 360^\circ$ (0°)、 $270^\circ \times 2 = 540^\circ$ (180°)回転するため、光の振動方向は変化しない。偏光板の偏光方向に対して1/2波長板の光学軸が 45° 、 135° 、 225° 、 315° の時には、 $45^\circ \times 2 = 90^\circ$ 、 $135^\circ \times 2 = 270^\circ$ 、 $225^\circ \times 2 = 450^\circ$ (90°)、 $315^\circ \times 2 = 630^\circ$ (270°)回転するため、光の振動方向が変化する（図3参照）。例えば、2枚の偏光板の偏光方向を揃えて重ね、その間に光軸が $\theta = 45^\circ$ となるように1/2波長板を挟んで光を入射すると、1/2波長板によって光の振動方向が 90° ($= 2 \times 45^\circ$)回転するため、偏光板は入射光を遮蔽する。

2.3 光学フィルタ

提案システムでは、光学フィルタの中でも、ある特定の波長よりも長波長側の光を透過し、短波長側の光をカットするフィルタ（以下、ロングパスフィルタと記す）を用いる。波長 A nm以上の光を透過するフィルタに $A > \alpha$ となる α nmの光と $\beta > A$ となる β nmの光を照射すると、フィルタは α nmの光を遮蔽し、 β nmの光を透過する。例えば、ロングパスフィルタの一つである、FUJIFILM社製のSC-74フィルタは、740nm以上の波長を持つ赤外光を透過し、それより短い波長を持つ光を遮蔽する。人間にとっての可視域にある波長範囲の短波

長限界は360 縞 400nm、長波長限界は760 縞 830nmとされている。そのため、このフィルタは人間の肉眼からは、740nm以上の波長の光を含む光源にかざしたときにはわずかに透明に見えるが、光源に直接かざしていないときには黒く不透明なものとして見える。

3 提案システム

本章では、提案システムの仕組みの概要と、提案システムに用いる素材の選定について述べる。

3.1 概要

提案システムでは、1/2波長板の両面をロングパスフィルタで覆い隠したオブジェクトを用いる。このオブジェクトを偏光方向を揃えた2枚の偏光板の間に挟み、偏光板の外側から赤外光を照射することで、オブジェクトに埋め込まれた1/2波長板の形状を、影としてスクリーン上に出現させる。さらにオブジェクトの回転角度に依存して影の出現/非出現を制御する。この形式を図4に示す。赤外光が偏光板（図4-a）を透過すると、偏光（図4-c）のみが放出される。この光は、ロングパスフィルタと1/2波長板で構成されるオブジェクトを透過する。このとき、オブジェクト内部の1/2波長板によって光の振動方向が回転し（図4-d）、もう一方の偏光板（図4-b）によって遮蔽される。これによって、偏光板の外側にあるスクリーンに影が出現する。赤外光による影は人の目には不可視であるため、赤外カメラを用いて影を撮像し、それをプロジェクタでスクリーンに投影することで視覚化する。この時、ユーザは偏光板（図4-b）を通して、スクリーンに生成された影を見ることになる。

偏光板が偏光できる光の波長領域は限られているため、照射する赤外光の波長の違いによって、生成される影の明瞭さは異なる。この性質を利用して、明瞭な影を提示する赤外波長と、不明瞭な影を提示する赤外波長を切り替えることで、情報が視覚化される条件を絞ることができる。

さらに、オブジェクトに2種類の形状情報を付与するために、1/2波長板2枚を異なる形状に切り取り、偏光方向に対してそれぞれの光学軸が 0° 、 45° となるように重ね合わせる。このオブジェクトを 45° ずつ回転させることで異なる形状の影が交互に生成されるようになる。これによって、情報の選択的な視覚化を可能にする。

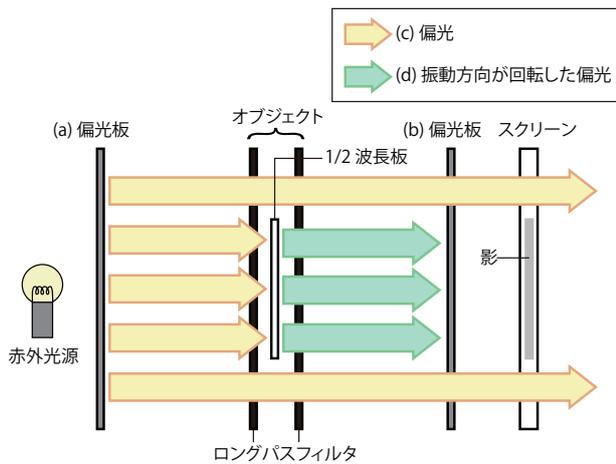


図4 提案システムの概要.

3.2 偏光板の種類選定

偏光板は、種類によって対応する波長領域が異なるため、明瞭な影を生成する偏光板の種類を選定する実験を行った。提案システムでは、赤外光を偏光板と1/2波長板で遮蔽することによって不可視な影を生成するが、それをカメラとPCを通して映像化された影をプロジェクタによって投影し、人の目に見える影を生成している。そのため、システムによって視覚化された映像としての影が明瞭となる条件が偏光板と1/2波長板のスペックを加味するだけでは判断し兼ねるため、提案システムに使用する偏光板の種類を選定を行った。

本実験では、可視光領域に対応した偏光板（以下、可視用偏光板と記す）と赤外光に対応した偏光板（以下、赤外用偏光板と記す）を用意し、影の形状が明瞭に提示される2枚の組み合わせを選定した。偏光板の組み合わせとして、(A) 可視用偏光板2枚、(B) 可視用偏光板1枚と赤外用偏光板1枚、(C) 赤外用偏光板2枚、の3条件を設定し、比較を行った。2枚の偏光板の偏光方向を揃えた状態で、偏光方向に対する1/2波長板の光学軸が0°時における影の明度と45°時における影の明度の差が最大になる条件を調べた。

図4に示す構成において、赤外光源の直下とスクリーン上に、2枚の偏光板を偏光方向を揃えて設置し、これらの間に1/2波長板を設置した。偏光板には、可視用偏光板（美工社製）と、赤外用偏光板（エドモンド・オプティクス・ジャパン社製）を用いた。赤外光源 - 1/2波長板間を400mm、スクリーン - 1/2波長板間を0mmの距離に設定し、光源には810nmの波長の赤外光を用

表1 偏光板の種類選定.

条件	明度 (0° 時)	明度 (45° 時)	明度差
A	190.0	169.1	20.9
B	173.2	138.8	34.4
C	136.5	86.5	50.0

いた状態で、偏光板の偏光方向に対する1/2波長板の光学軸を0°および45°としたときに生成される影を、スクリーンの背面から赤外カメラで撮影した。なお、スクリーンには背面投影可能な素材を用い、全ての条件においてカメラの露光は固定された。

撮影した画像内の影の明度を、画像編集ソフトGIMP (<http://www.gimp.org/>) のヒストグラムツールを用いて計測し、その数値を比較した。明度は0縞255の値で計測され、値が小さいほど暗く、大きいほど明るいと判断される。

3つの条件において、偏光板の偏光方向に対して1/2波長板の光学軸が0°時と45°時の明度とその差を表1に示す。明度差は、条件(C)が最も大きいことが確認された。しかし、条件(C)でスクリーン上に配置した赤外用偏光板は、人の目には黒く不透明な素材であるため、スクリーン自体が偏光板に遮蔽されて影が視認できなくなる。従って、提案システムには、条件(C)の次に明度差が大きい条件(B)を採用し、可視用偏光板をスクリーン上に配置し、赤外用偏光板を赤外光源直下に配置することとした。

3.3 赤外光の波長選定

提案システムでは、赤外光の波長を切り替えることで影の出現/非出現を制御し、ある特定の条件下でのみ影が生成されるという制約を設ける。赤外光の波長によって生成される影の明度が異なるため、複数種の赤外波長(770nm, 810nm, 870nm, 940nm)のうち、影の形状を明瞭に提示する波長と、提示しない波長を選定する実験を行った。なお前節で述べた実験と同様に、提案システムでは光源と光学素子だけではなく、カメラやPC、プロジェクタを用いて映像化された影を人の目に見える影として生成している。従って、システムによって視覚化された映像としての影の明度は赤外光のスペックを加味するだけでは判断し兼ねるため、提案システムに使用する赤外光の波長選定を行った。

偏光板の偏光方向に対する 1/2 波長板の光学軸が 0° 時における明度と 45° 時における明度の差が最大であるとき、影の形状が明瞭であるといえる。反対に、0° 時と 45° 時における影の明度差が最小であるとき、影の形状は不明瞭であるといえる。従って、影の生成を制御するために、明度差が最大になる波長と、最小になる波長を選定することとした。

図 4 に示す構成において、赤外光源の直下とスクリーン上に 1 枚ずつ偏光板を偏光方向を揃えて設置し、これらの間に 1/2 波長板を設置した。前節で得られた結果を反映し、赤外光源の直下には赤外用偏光板を、スクリーン上には可視用偏光板を用いた。赤外光源には、波長が 770nm, 810nm, 870nm, 940nm の 4 種類の赤外ライトを用意し、それぞれを照射した条件の下で、偏光板の偏光方向に対する 1/2 波長板の光学軸を 0° および 45° としたときに生成される影を、赤外カメラで撮影した。なお、スクリーン、1/2 波長板、赤外光源間の距離の違いによって影の明度が変化するため、スクリーン - 1/2 波長板間、1/2 波長板 - 赤外光源間の各々について 100mm, 200mm, 300mm の 3 条件で距離を設定し、それらの組み合わせによる計 9 パターンの位置設定で撮影した。撮影した画像内の影の明度を、前節と同じく画像編集ソフト GIMP のヒストグラムツールを用いて計測し、それぞれの波長の条件において 9 パターンの位置設定で撮影された影の明度の平均値を算出し、比較した。前節と同様に、スクリーンには背面投影可能な素材を用い、全ての条件においてカメラの露光は固定された。

各々の波長における平均の明度を表 2 に示す。偏光板の偏光方向に対する 1/2 波長板の光学軸が 0° 時、45° 時にできる影の明度差は、770nm の赤外光照射時に最大となり、940nm の赤外光照射時に最小となることが確認された。このことから、770nm の赤外波長を照射した時には影の形状が明瞭であり、940nm の赤外波長を照射した時には影の形状が不明瞭であることが分かった。この結果を鑑み、赤外光源として 770nm と 940nm の 2 種類の波長を独立に照射できるライトを実装した。

4 実装

本章では、前章で述べた提案システムの概要と素材の選定結果に基づいたシステムの実装について述べる [1]。

表 2 赤外光の波長選定。

波長 (nm)	明度 (0° 時)	明度 (45° 時)	明度差
770	174.1	124.3	60.3
810	212.4	186.6	25.7
870	172.1	161.0	11.1
940	198.5	196.4	2.1

4.1 オブジェクト

図 5 にオブジェクトの構成図を示す。オブジェクトは 1/2 波長板（光洋社製）と 740nm 以上の波長を持つ光を透過するロングパスフィルタである SC-74 フィルタ（FUJIFILM 社製）で構成される。1/2 波長板 2 枚を異なる任意の形状に切り取り、それぞれの光学軸が偏光板の偏光方向に対して各々 45°（図 5-A）、0°（図 5-B）となるように重ね、透明のアクリル板（アクリルサンデー社製、硬質塩化ビニール板）に貼付する。さらにこの外側を SC-74 フィルタで覆う。

4.2 システム構成

赤外光による影を視覚化するシステムを図 6 に示す。このシステムはデスクライト、赤外カメラ、偏光板、プロジェクタ、テーブル状のスクリーンによって構成される。デスクライトには 2 種類の波長の赤外光（770nm, 940nm）を照射できる LED を組み込んでいる。これにより、影が生成される条件と生成されない条件を再現できるようになっている。カメラには近赤外線領域も撮影可能な CCD カメラ（レンズ：TAMRON 社製、12VM412ASIR、カメラ：Watec 社製、WAT-902-H-ULTIMATE）を用いた。不可視な影を撮像するために、レンズには SC-74 フィルタを貼付した。また、スクリーン素材に背面投影用のスクリーンフィルム（KIMOTO 社製、DILAD スクリーン WSK）を用いることで、赤外光によるオブジェクトの不可視影とプロジェクタ映像の投影を可能にした。提案システムでは、プロジェクタをテーブル下部に配置し、スクリーン下側から映像を投影することで、プロジェクタによる実影と物体による不可視影との混合を避けている。

光の偏光による影を生成するために、デスクライトには 800nm 縞 2000nm の波長領域に対応した赤外用偏光板（エドモンド・オプティクス・ジャパン社製）を取り付けている。スクリーン上には可視光のみを偏光

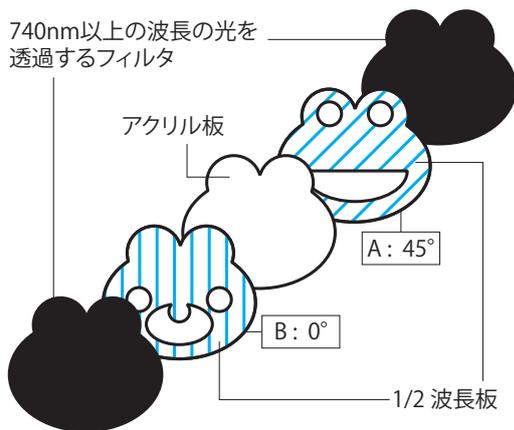


図5 オブジェクトの構成図.

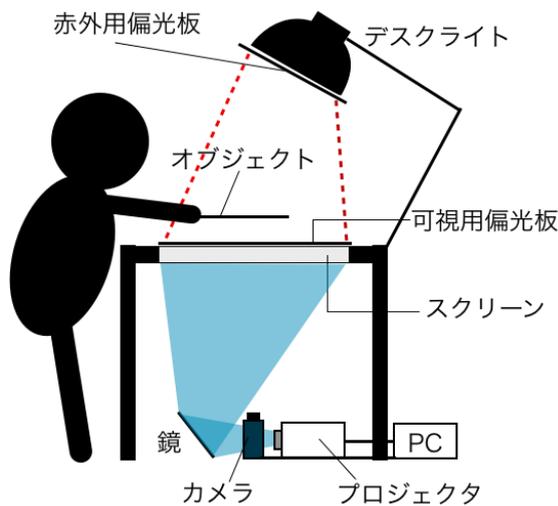


図6 システム構成図.

させることができる可視光用偏光板（シータスク社製，LN-1804P）を取り付けている．両方の偏光板を，偏光方向を揃えて取り付けている．

4.3 アプリケーション

提案システムを用いたアプリケーションを実装した．ユーザは赤外ライトが照射されたスクリーン上にオブジェクトをかざして角度を変えることによって，生成される影の図柄を切り替えることができる．

ライトの偏光方向に対するオブジェクトの角度が 0° である場合，偏光方向に対する光学軸の角度が 45° である図 5-A のみが光を遮蔽し， 0° である図 5-B は光を透過する．その結果，図 5-A の影が生成される．また，オブジェクトを 45° 回転させた場合，偏光方向に対する光学軸の角度が 45° となった図 5-B が光を遮蔽し， 90° と

なった図 5-A が光を透過する．その結果，図 5-B の影が生成される．このように，オブジェクトの角度を 45° 回転させるごとに影の形状を交互に変化させることができる．図 7 は 770nm ， 940nm 波長の赤外光をオブジェクトに照射したときのシステムの様子である． 770nm の赤外光を照射した場合，オブジェクトの角度に応じて 2 種類の影が切り替わる様子が確認できるが， 940nm の赤外光を照射した場合は，影が生成されず，形状も切り替わらないことが確認できる．このように，オブジェクトに内包された情報は，特定の波長の赤外光を照射した場合でのみ視覚化される．

また，この仕組みを応用し，角度に応じて“ A ”と“ B ”のアルファベットが視覚化される透明オブジェクトを作成した．このオブジェクトには， $1/2$ 波長板をピクセル状に配置し，オブジェクトの角度を変えても常に影となる部分に 800nm 以上の波長を持つ光を透過するロングパスフィルタである IR-80 フィルタ（FUJIFILM 社製）を貼付している（図 8）．これにより，オブジェクトの外観からは秘匿された文字を視認することはできないが，影を作った時にのみ，秘匿された 2 種類の文字が視覚化される．図 9 は 770nm ， 940nm 波長の赤外光を透明オブジェクトに照射したときのシステムの様子である． 770nm の赤外光を照射した場合，オブジェクトの角度に応じて 2 種類の影が切り替わる様子が確認できるが， 940nm の赤外光を照射した場合は，影が生成されず，形状も切り替わらないことが確認できる．このように，提案手法ではオブジェクトの外観とは異なる 2 種類の情報を秘匿し，それらを影の形状として選択的に視覚化できることが示された．本提案手法では，オブジェクトに対して 2 種類の情報を付与し，それらを選択的に切り替えることが可能であるものの，一度格納された情報を後から変更することは容易ではない．このことから，実物体に対し物理的に情報を秘匿する手法の特徴である，唯一性を持たせることが可能である．また，本提案手法では，オブジェクトに情報が光学フィルタの形状として物理的に格納され，光の透過・遮蔽によってできる影の形が直接情報として表現される．これらの条件によって，ユーザが特定の波長を持った光にオブジェクトをかざす，特有の操作を行うことによって，情報が視覚化される．さらに，ユーザがオブジェクトの角度を変える操作を行うことによって，偏光板と $1/2$ 波長版によって光の透過遮

断状態が変化するという物理的な原理のもと、視覚化される情報が変更される。このことから、実物体に対し物理的に情報を秘匿する手法の特徴である、固有性を持たせることが可能である。これらの特徴を持った上で、本提案手法において2種類の情報を切り替え可能にした点は、1章で述べた(2)の制約である、複数の情報を付与した場合、その中から一部だけを選択的に視覚化することが容易ではないという点を緩和した。このことから本研究では、実物体に情報を秘匿する手法を、その性質を保持したまま拡張することが可能となった。本提案手法は、カードや本などの紙媒体を拡張するような応用の仕方が考えられる。これらの媒体に対し物理的に秘匿された情報を、固有の操作によって取得可能にすることによって、媒体そのものの価値と、情報を得る行為の面白さを高められると考えられる。

4.1節で述べたオブジェクトの外観が全面黒一色に限定されるのに対し、透明オブジェクトには、可視光下でのオブジェクトの外観に任意のパターンをデザインできるといった利点がある。ただし透明オブジェクトでは、オブジェクトに付与された情報がロングパスフィルタで覆われなくなるため、可視光下において可視光用偏光板を用いたときにも影が視覚化される。すなわち、情報を秘匿できる条件が940nmの赤外光を照射したときのみ限定される点で、情報秘匿手法としての利用用途に限られるというデメリットがある。これらのことから、情報秘匿としての用途もしくはオブジェクトデザインの自由度のどちらを優先するかを利用するシチュエーションに合わせて考慮し、オブジェクトの種類を使い分ける必要がある。

5 関連研究

本研究では、実物体への情報の秘匿と選択的な視覚化を行い、その手法として、偏光板の性質を利用した。本章では、関連する研究について述べる。

5.1 物体に秘匿された情報を選択的に視覚化する手法

人間の目には不可視な素材を用いて物体に情報を付与し、それをカメラ映像内で認識する手法が提案されている。赤外線透過顔料や紫外光の照射によって発光する不可視インクを物体に塗布し、不可視光の照射とカメラ撮影によって視覚化する手法も提案されている[2, 3]。これらは特定のインタラクションに対して1つの情報しか

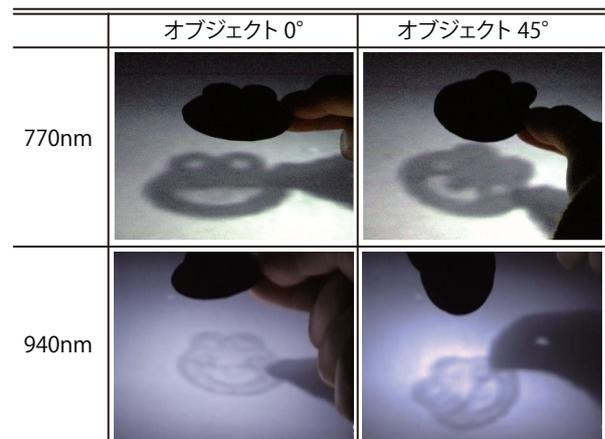


図7 オブジェクトから生成される影。

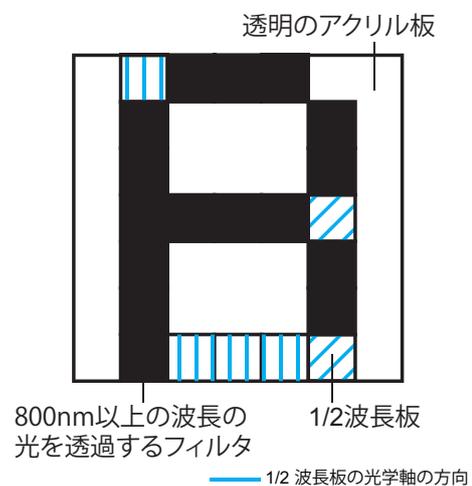


図8 透明オブジェクトの構成図。

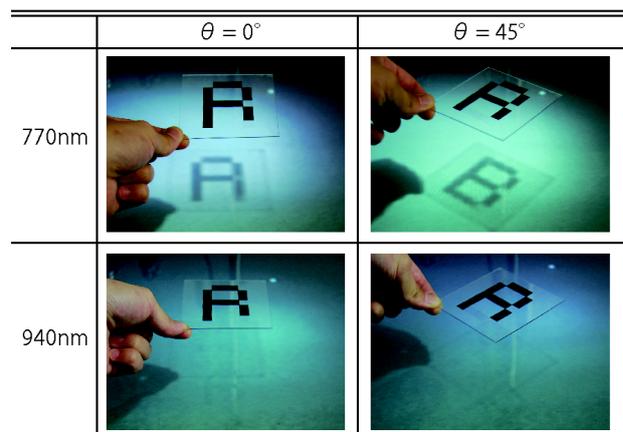


図9 透明オブジェクトから生成される影。

視覚化することができない。白井らによる秘映プロジェクトでは、赤外光のプロジェクションによって物体に不

可視な情報を付与し、それを赤外カメラによって撮影することによって視覚化することができる [4]. また、可視光の中に高速な点滅パターンとして情報を埋め込む手法 [5] や、LED の色変調を利用して光に ID を付与する手法も提案されている [6]. これらの手法では、光のパターンを計算機で制御することによって付与する情報を多様に変更できるという利点がある。しかし、これらの手法で情報を付与する対象は、ある物体における特定のエリアであり、ユーザが手に持って移動させる物体に情報を付与することは困難である。我々の先行システムである Restive Shadow では、光を遮断する素材と異なる波長の赤外光を透過する 2 種類のロングパスフィルタそれぞれを任意の形状に切り取って重ね合わせたものに、異なる波長の赤外光を照射することによって、異なるレイヤの形状を影として視覚化することができる [7]. この手法では、遮光素材と IR フィルタの形状が組み合わさったものが影の形状として視覚化されるため、付与できる情報の種類には制約がある。本研究では角度によって光の透過/遮蔽を変化させることができる偏光板と 1/2 波長板を利用するため、物体に付与できる形状に制約が存在しない。

上述したような光を用いた手法の他に、温度変化によって可視状態が変化するインクを用いて、情報の付与と選択的な視覚化を行う手法も提案されている [8, 9]. 本研究ではユーザの操作に応じた即時的な情報の切り替えを可能にするために、光を用いた情報の選択的視覚化を行っている。また、特定の情報を持ったパターンを物体に付与し、そこに別のパターンを重畳することによって選択的に視覚化する手法も提案されている [10, 11]. これらの手法では、パターンの重畳において位置合わせが厳格であることから操作性に欠けるきらいがある。本研究の提案手法では、オブジェクトをかざす、傾けるという単純な操作によって情報を選択的に視覚化することができる。

5.2 偏光板を用いた情報提示手法

小池らはカメラ映像上でパターンを認識できる透明なマーカを提案している [12]. 1/2 波長板で作成されたマーカを液晶ディスプレイ上に置き、それを偏光板を取り付けたカメラで撮影すると、カメラ映像上でのみマーカのパターンを認識できる。この手法に対して、本研究では 2 枚の 1/2 波長板を重ね合わせ、1 つのオブジェク

トから 2 種類の情報を選択的に視覚化する点で差異がある。偏光板アート [13] では、1/2 波長版を任意の形に切り取り、2 枚の偏光板の間に挟むと色が付いて見える仕組みをグラフィック表現に利用している。偏光板の角度を変えると、1/2 波長版の色や変色される部分が変化し、異なるパターンが視覚化される。偏光板が取り付けられたメガネやファインダーを用いて液晶ディスプレイやプロジェクション映像を選択的に切り替える手法も提案されている [14, 15, 16]. これらの手法において情報を切り替える際、ユーザは偏光板を介して情報を見る必要があるが、本研究では情報を影として視覚化することによって、偏光板を介さずに情報を視認できるようにしている。Isogawa らは、テーブルトップシステムにおける情報表示において、光を遮蔽して影を作った領域に、他の領域とは異なる情報を提示する手法を提案している [17]. この際に、遮蔽物体自体にはプロジェクション映像を映さずに、テーブル面にだけ映像を映すといった選択的な映像投影を実現するために偏光板を用いている。この手法では、テーブル面に予め複数の情報を付与しておき、影となる領域とそうでない領域の違いによって異なる情報を視覚化しているのに対し、本研究では遮蔽物自体に情報を付与し、そこから異なる 2 種類の情報を視覚化している点で異なる。

5.3 影を拡張させる手法

人物の動きや形状をセンシングし、影を拡張させる手法が提案されている。Miwa らによる Shadow Awareness では、人物の動きをサーモカメラによってセンシングし、それに合わせて様々な形や色が変わった影を生成し、人物の影としてプロジェクションを行っている [18]. Iwasaki らは、深度センサを用いて人の動きを検出し、バーチャルな影絵と実際の影の接触に応じて影の中に様々なアニメーションを付与している [19]. これらの手法では、CG によって人工的に作られた影が用いられているが、本研究では、CG による人工影を使用せず、物体の不可視な影を視覚化することのみを行うことによって、実物体に内包された形状そのものを影として反映させている。

Minomo らは、補色を用いて自己の影を彩りあるものにするシステムを提案している [20]. 2 台のプロジェクタから、互いに補色関係にある映像を、投影面が重なるように投影しておくことにより、光が遮蔽されて影とな

る領域にのみ彩のある映像が視覚化される。橋田らは、光で発色を制御できるフォトクロミック材料を用いて、光の遮蔽物の影をスクリーン上に生成したり、その発色を制御する手法を提案している [21]。これらは、光を遮蔽することによって生成される影の性質を利用している点で本研究と類似するが、影によって提示される情報が、遮蔽物ではなくスクリーン上に付与されている点でアプローチが異なる。

6 おわりに

本稿では、光学素子を用いてオブジェクトに情報を秘匿し、それを光にかざして影を作ることによって秘匿された情報を影の形状として視覚化可能なシステムを提案した。本手法によって、オブジェクトには2種類の情報を秘匿することができ、それぞれの情報はオブジェクトの角度によって選択的に視覚化することが可能であることが示された。また、特定の波長を持った光にかざしたときにのみ影が生成されることを利用し、情報が視覚化される条件を絞り込むことも可能であることが示された。今後は、ユーザにオブジェクトの自由制作を行ってもらえるようなワークショップを開くことによって、情報の秘匿や影とのインタラクションを体験してもらい、そのフィードバックからオブジェクトに情報を秘匿する手法の簡便化や、本提案手法をエンタテインメントとして発展させるための課題を明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] S. Sakaguchi, H. Tono, and M. Matsushita. Slanting Shadow: Changing Invisible Shadow Shapes by Rotation for Expanding Shadowgraph Experience. SIGGRAPH Asia 2014 Emerging Technologies, ArticleNo. 12, pp. 12:1–12:3, 2014.
- [2] 山宮 士郎, 牧野 秀夫, 廣野 幹彦, 前田 義信, 石井 郁夫. 赤外線透過顔料を用いた物体識別手法. 電子情報通信学会論文誌. D-I, 情報・システム, I-情報処理, Vol. 83, No. 7, pp. 797–803, 2000.
- [3] 上條 浩一, 張 綱, 上條 昇, 南 正輝, 森川 博之. 不可視バーコードにおける印刷支援システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 11, pp. 2607–2617, 2009.
- [4] 白井 良成, 松下 光範, 大黒 毅. 秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張. WISS2003, pp. 115–122, 2003.
- [5] 木村 翔, 筧 康明, 高橋 桂太, 苗村 健. 可視光通信プロジェクタと高速度カメラを用いたユビキタス情報環境の基礎検討. 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 91, No. 12, pp. 2781–2790, 2008.
- [6] 倉木 健介, 加藤 圭造, 田中 竜太. モノに情報を付与できる LED 照明技術. FUJITSU, Vol. 66, No. 5, pp. 88–93, 2015.
- [7] 阪口 紗季, 東納 ひかり, 松下 光範. Restive shadow: 多波長赤外光を用いた拡張影生成システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 4, pp. 1239–1250, 2016.
- [8] 辻井 崇紘, 小泉 直也, 苗村 健. Inkantatory paper: 銀ナノ粒子インクを用いた発熱制御に基づく発色式紙面インタフェース. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 2, pp. 107–113, 2015.
- [9] 橋田 朋子, 西村 光平, 苗村 健. Hand-rewriting: 紙面上における人とコンピュータの協調的な加筆と消去. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 367–375, 2014.
- [10] R. Shogenji and J. Ohtsubo. Hiding information using a checkered pattern. Optical Review, Vol. 16, No. 5, pp. 517–520, 2009.
- [11] 福井 真理子, 阪口 紗季, 松下 光範. 映像重畳による選択的情報表示手法の検討. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) ,2016-EC-39(1),1-8, 2016.
- [12] 小池 英樹, 西川 渉, 福地 健太郎. 液晶型テーブルトップシステムにおける偏光の応用: 光学フィルムを用いた透明マーカの開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 1, pp. 111–119, 2009.
- [13] 有限会社プリントアート. 偏光板アート. <http://www.print-art.co.jp/henkoban.html>. 参照: 2016-6-28.
- [14] H. Suzuki, R. Hsieh, and A. Shirai. Expixel: Pixelshader for multiplex-image hiding in consumer 3d flat panels. ACM SIGGRAPH 2014 Posters, Article No. 63, 2014.
- [15] 櫻井 智史, 浅井 和広, 北村 喜文. Mysterious POND. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌,

Vol. 15, No. 1, pp. 75–81, 2010.

- [16] S. Sakurai, Y. Kitamura, S. Subramanian, and F. Kishino. A visibility control system for collaborative digital table. *Personal Ubiquitous Computing*, Vol. 13, No. 8, pp. 619–632, 2009.
- [17] M. Isogawa, D. Iwai, and K. Sato. Making graphical information visible in real shadows on interactive tabletops. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 20, No. 9, pp. 1293–1302, 2014.
- [18] Y. Miwa, S. Itai, T. Watanabe, and H. Nishi. Shadow Awareness: Enhancing Theater Space Through the Mutual Projection of Images on a Connective Slit Screen. *ACM SIGGRAPH 2011 Art Gallery*, pp. 325–333, 2011.
- [19] H. Iwasaki, M. Kondo, R. Ito, S. Sugiura, Y. Oba, and S. Mizuno. A Method of Touching and Moving Virtual Shadows with Real Shadows. *2015 International Conference on Cyberworlds (CW)*, pp. 359–360, 2015.
- [20] Y. Minomo, Y. Kakehi, M. Iida, and T. Nae-mura. Transforming your shadow into colorful visual media: multiprojection of complementary colors. *ACM Computers in Entertainment*, Vol. 4, No. 3, Article No. 10, 2006.
- [21] 橋田 朋子, 笈 康明, 苗村 健. ソラ・カラ : 太陽光を活用した屋外空間の発色制御. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 17, No. 3, pp. 279–288, 2012.

阪口 紗季



2012年関西大学総合情報学部卒業。2014年同大学大学院総合情報学研究科博士課程前期課程修了。現在、同大学院博士課程後期課程在学中。ヒューマンコンピュータ

インタラクションに関する研究に従事。2013年 Laval Virtual Award ほか各賞受賞。情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本感性工学会, ACM 各会員。

東納 ひかり



2014年関西大学総合情報学部卒業。現在, スミセイ情報システム株式会社に所属。在学中はヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。

松下 光範



1995年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻制御工学分野博士前期課程修了。同年, 日本電信電話株式会社入社。2008年関西大学総合情報学部准教授。2010年同教授。現在に至る。自然言語理解, ヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。博士(工学)。2003年情報処理学会論文賞, 2007年日本知能情報ファジィ学会論文賞, 2007年日本バーチャルリアリティ学会論文賞 ほか各賞受賞。情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 人工知能学会, 芸術科学会, ACM 各会員。